

Аналогично для скорости получим:

$$f_{vp} = 0,7 \cdot 10^7 P^{-1}, \quad (20)$$

$$v_p / v_{pn} f_{vp} = 0,7 \cdot 10^7 v_{pn} P^{-1}. \quad (21)$$

Таким образом, полученные критерии и индикаторы подобия и функции нелинейного преобразования, полученные экспериментально, позволяют распространить результаты исследований на ряд подобных механизмов, при этом исследованный механизм рассматривается как их нелинейная модель.

Принимая указанные параметры модельного ударного механизма за оптимальные и задаваясь величинами энергии удара A_n , частотой ударов n_n , давлением источника питания P_n , можно предложить следующую методику расчета ударного механизма, подобного исследованному.

Определить:

– скорость приложения ударной нагрузки к инструменту

$$v_{pn} = \sqrt{2A_n M_m^{-1} f_{vp}^{-1}} = 0,22 \cdot 10^{-3} \sqrt{A_n P_n}, \quad (22)$$

– массу бойка

$$M_n = M_m f_{vp} = 42 \cdot 10^6 P_n^{-1}, \quad (23)$$

– перемещение бойка в фазе рабочего хода

$$x_{pn} = x_{pm} f_{xp} = 15,68 \cdot 10^4 P_n^{-1}, \quad (24)$$

– перемещение бойка в фазе холостого хода

$$x_{vn} = x_{vm} f_{xp} = 10,5 \cdot 10^4 P_n^{-1}, \quad (25)$$

– скорость бойка в конце фазы холостого

хода
$$v_{vn} = v_{vm} f_{vp} = 30,66 \cdot 10^6 P_n^{-1}, \quad (26)$$

– площадь плунжера устройства рабочего

хода
$$S_{pn} = S_{pm} f_v^2 = 470,4 \cdot 10^8 P_n^{-2}, \quad (27)$$

– площадь плунжера устройства рабочего

хода
$$S_{vn} = S_{vm} f_v^2 = 235,2 \cdot 10^8 P_n^{-2}. \quad (28)$$

При этом значения энергии удара A_n и давления источника питания P_n должны подставляться в расчетные формулы в единицах СИ.

Список использованной литературы:

1. Гидравлический ударный узел к бурильной машине / Павлов А.С., Эпов Г.К., Лурьев И.Ф., Бледных Л.С.: Информационный листок / КазНИИТИ. – Алма-Ата, 1974, №384, серия 07.06.
2. Веников В.А. Теория подобия и моделирования. – М.: Высшая школа, 1973.

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ТОКАРНЫХ ОПЕРАЦИЙ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Изложен подход к получению априорных оценок надежности технологических систем токарной обработки деталей, относящихся к классу валов (осей), базирующийся на имитационном моделировании функционирования технологической системы работой системы массового обслуживания. Получено решение системы уравнений, описывающей функционирование рассматриваемой системы массового обслуживания в стационарном режиме. Приведены результаты расчета вероятности безотказной работы технологической системы токарной операции, выполненные для условий действующего производства.

Одной из основных проблем современного металлообрабатывающего производства является проблема повышения экономической эффективности как вновь проектируемых, так и уже существующих технологических систем (ТС) металлообработки. Возможным направлением решения данной проблемы является разработка методов обеспечения необходимых значений показателей качества ТС, к которым можно отнести и показатели ее надежности. В практике отечественной металлообработки наиболее распространенными являются технологические системы токарной обработки. Недостаточный уровень надежности данных ТС, особенно на чистовых операциях, приводит к увеличению брака выпускаемой продукции, росту ее себестоимости из-за увеличения расходов всех видов ресурсов и повышения затрат на устранение отказов инструмента, оборудования и отказов по показателям качества изготавливаемой продукции. Поэтому задача оценки показателей надежности ТС токарных операций и использования полученных оценок в качестве дополнительных критериев при оптимизации операционных технологических процессов (назначении режимов резания, выборе геометрических параметров режущего инструмента, разработке правил его замены и т. д.) является актуальной народнохозяйственной задачей.

Ряд работ [1, 2], посвященных данной проблематике, затрагивает лишь отдельные аспекты решения данной задачи, такие, как оценка условий возникновения отказов в отдельных подсистемах ТС. Очевидным недостатком вышеуказанных работ является их ориентация на методы оценки показателей надежности ТС по результатам выборочных исследований, которые не позволяют выявить влияние основных технологических факторов, характерных для условий токарной обработки, как на надежность ТС в целом, так и на надежность ее от-

дельных подсистем. Кроме того, использование вышеуказанных методов базируется на получении достоверных оценок параметров распределений, используемых для оценки надежности ТС, а также проверке гипотез о характере закона распределения того или иного технологического фактора, что в условиях ограниченности экспериментальных данных представляет достаточно серьезную проблему.

Априорный анализ надежности ТС токарной операции возможен на основе использования системного подхода при рассмотрении процессов возникновения отказов в ее основных подсистемах и связан с разработкой как новых математических моделей, описывающих функционирование ТС, так и адаптацией существующих для анализа условий возникновения всех видов преимущественных отказов, которые возможны при обработке деталей.

Разработка модели для прогнозирования надежности ТС токарной операции осуществлялась исходя из допущения о том, что критерием отказов, возникновение которых возможно при обработке детали, является наступление одного или одновременно нескольких следующих событий:

- превышение одним или несколькими значениями показателей качества обработанной детали своих предельно допустимых значений;
- прекращение функционирования технологической системы вследствие возникновения отказа в одной или нескольких подсистемах, входящих в ее состав.

Все отказы, возникающие в процессе обработки заготовки, предлагается разделить на полные и параметрические. Параметрические отказы приводят к ухудшению технических показателей детали, обрабатываемой на рассматриваемой операции, что обуславливает необходимость дополнительной обработки, не предусмотренной технологическим процессом, либо

усложняет условия обработки на последующей операции. Полные отказы, как правило, приводят к образованию неисправимого брака детали или являются причиной полной остановки функционирования технологического процесса ее изготовления.

Классификация возможных отказов в обработанной детали, отказов режущего инструмента, характерных для условий чистовой токарной обработки наружных цилиндрических поверхностей деталей, относящихся к классу валов (осей), представлена в таблицах 1, 2.

Количественную оценку надежности ТС токарной операции предлагается осуществлять моделированием ее функционирования систе-

Таблица 1. Классификация видов отказов режущего инструмента, используемого на операциях чистовой токарной обработки наружных цилиндрических поверхностей деталей, относящихся к классу валов (осей)

№	Основные виды отказов
1	Адгезионный износ по задней поверхности режущего инструмента
2	Адгезионный износ по передней поверхности режущего инструмента
3	Усталостное разрушение режущей части инструмента

Таблица 2. Классификация видов отказов, возникновение которых возможно при токарной обработке наружных цилиндрических поверхностей деталей, относящихся к классу валов (осей)

№	Основные виды отказов
Полные отказы	
1	Выход размера обработанной детали за нижнюю границу поля допуска
2	Превышение показателями, характеризующими точность формы обработанной детали своих предельно допустимых значений
Параметрические отказы	
1	Выход размера обработанной детали за верхнюю границу поля допуска
2	Превышение показателями, характеризующими шероховатость и волнистость поверхности своих предельно допустимых значений
3	Несоответствие параметров, характеризующих физико-механическое состояние поверхностного слоя (наклеп, остаточные напряжения), требованиям нормативно-технической документации.

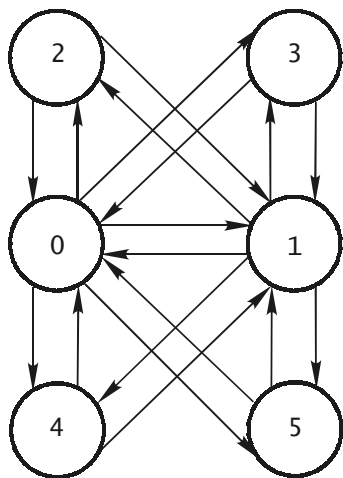


Рисунок 1. Граф состояний СМО, моделирующей надежность технологической операции

мой массового обслуживания (СМО) [3] с графом состояний, представленным на рисунке 1.

Требованиями на обслуживание в данной системе являются заготовки, поступающие для обработки на рассматриваемую технологическую операцию. Согласно графу состояний возможны следующие состояния СМО: «0» – система готова к обслуживанию или содержит обслуженное требование; «1» – нагруженное состояние системы в ходе обслуживания требования; «2-5» – состояния отказов в подсистемах «обрабатываемый материал», «инструмент», «оборудование», «средства автоматизации и механизации» соответственно.

Функционирование рассматриваемой СМО в нестационарном режиме описывается системой дифференциальных уравнений Колмогорова:

$$\begin{cases} -\sum_{j=1}^5 \lambda_{0j} P_0 + \lambda_{10} P_1 + \lambda_{20} P_2 + \lambda_{30} P_3 + \lambda_{40} P_4 + \lambda_{50} P_5 = \frac{dP_0}{dt}, \\ -\sum_{j=1}^5 \lambda_{1j} P_1 + \lambda_{01} P_0 + \lambda_{21} P_2 + \lambda_{31} P_3 + \lambda_{41} P_4 + \lambda_{51} P_5 = \frac{dP_1}{dt}, \\ -(\lambda_{21} + \lambda_{20}) P_2 + \lambda_{02} P_0 + \lambda_{12} P_1 = \frac{dP_2}{dt}, \\ -(\lambda_{31} + \lambda_{30}) P_3 + \lambda_{03} P_0 + \lambda_{13} P_1 = \frac{dP_3}{dt}, \\ -(\lambda_{41} + \lambda_{40}) P_4 + \lambda_{04} P_0 + \lambda_{14} P_1 = \frac{dP_4}{dt}, \\ -(\lambda_{51} + \lambda_{50}) P_5 + \lambda_{05} P_0 + \lambda_{15} P_1 = \frac{dP_5}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

при начальных условиях:

$$P_0(0) = 1, P_1(0) = P_2(0) = P_3(0) = P_4(0) = P_5(0) = 0 \quad (2)$$

и условии нормировки:

$$P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 = 1, \quad (3)$$

где P_i ($i = 0 \dots 5$) – вероятность i -ого состояния; λ_{ij} , ($i, j = 0 \dots 5, i \neq j$) – интенсивности переходов из состояния i в состояние j .

Аналитическое решение системы (1) может быть получено при известной форме зависимостей параметров λ_{ij} от времени. В общем виде получение данного решения является затруднительным, поэтому в качестве допущения предлагается принять, что потоки событий, переводящие рассматриваемую СМО из состояния в состояние, являются простейшими пуассоновскими потоками, удовлетворяющими свойствам ординарности, стационарности и отсутствия последействия. В соответствии с данным допущением в СМО

существует стационарный режим, для которого вероятности состояний могут быть найдены из решения системы алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} -\sum_{j=1}^5 \lambda_{0j}P_0 + \lambda_{10}P_1 + \lambda_{20}P_2 + \lambda_{30}P_3 + \lambda_{40}P_4 + \lambda_{50}P_5 = 0, \\ -\sum_{\substack{j=0 \\ j \neq 1}}^5 \lambda_{1j}P_1 + \lambda_{01}P_0 + \lambda_{21}P_2 + \lambda_{31}P_3 + \lambda_{41}P_4 + \lambda_{51}P_5 = 0, \\ -(\lambda_{21} + \lambda_{20})P_2 + \lambda_{02}P_0 + \lambda_{12}P_1 = 0, \\ -(\lambda_{31} + \lambda_{30})P_3 + \lambda_{03}P_0 + \lambda_{13}P_1 = 0, \\ -(\lambda_{41} + \lambda_{40})P_4 + \lambda_{04}P_0 + \lambda_{14}P_1 = 0, \\ -(\lambda_{51} + \lambda_{50})P_5 + \lambda_{05}P_0 + \lambda_{15}P_1 = 0, \end{cases} \quad (4)$$

с учетом условия (3).

В результате решения системы уравнений (4) была получена следующая оценка вероятности P_1 , которая определяет вероятность безотказной работы технологической операции при обработке заготовки:

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{C_1}{C_2 - C_3 + C_4}, \\ C_1 &= \sum_{i=1}^5 \lambda_{0i} - \sum_{i=2}^5 \frac{\lambda_{0i} \cdot \lambda_{i0}}{\lambda_{i1} + \lambda_{i0}}, \\ C_2 &= \left(1 - \sum_{i=2}^5 \frac{\lambda_{i1}}{\lambda_{i1} + \lambda_{i0}}\right) \cdot \left(\sum_{i=1}^5 \lambda_{0i} - \sum_{i=2}^5 \frac{\lambda_{0i} \lambda_{i0}}{\lambda_{i1} + \lambda_{i0}}\right), \\ C_3 &= \lambda_{10} \cdot \left(1 + \sum_{i=2}^5 \frac{\lambda_{0i}}{\lambda_{i1} + \lambda_{i0}}\right), \\ C_4 &= \left(1 - \sum_{i=2}^5 \frac{\lambda_{0i}}{\lambda_{i1} + \lambda_{i0}}\right) \cdot \sum_{i=2}^5 \frac{\lambda_{i1} \lambda_{i0}}{\lambda_{i1} + \lambda_{i0}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Сделанное допущение о принадлежности потоков событий, переводящих СМО из состояния в состояние, к классу простейших пуассоновских потоков, предопределяет более жесткие условия работы СМО по сравнению с реально существующими технологическими системами. Поэтому оценка вероятности безотказной работы СМО (5) может рассматриваться как «нижняя оценка надежности» ТС токарной операции.

Значения интенсивностей переходов СМО из состояния в состояние определяются следующими выражениями:

$$\lambda_{01} = \frac{1}{T}; \quad \lambda_{10} = \frac{1}{T_{10}};$$

$$\lambda_{0i} = \frac{1}{T_{0i}}; \quad \lambda_{i0} = \frac{1}{T_{i0}} \quad (i = 2, \dots, 5); \quad (6)$$

$$\lambda_{ii} = \frac{1}{T_{ii}}; \quad \lambda_{i1} = \frac{1}{T_{i1}} \quad (i = 2, \dots, 5),$$

здесь T – среднее время между поступлениями требований на обслуживание в СМО; T_{10} – среднее время, необходимое для обслуживания требования; T_{ii} – средние промежутки времени между возникновением отказов в подсистемах «обрабатываемый материал» ($i = 2$), «инструмент» ($i = 3$), «оборудование» ($i = 4$), «средства автоматизации и механизации» ($i = 5$) в нагруженном состоянии; T_{i1} – средние промежутки времени, необходимые для устранения параметрических отказов в выделенных подсистемах; T_{i0} – средние промежутки времени, необходимые для устранения полных отказов в выделенных подсистемах.

Значения величин T_{0i} , T_{i0} , T_{ii} определяются на основе статистической обработки литературных данных и данных технологической практики, содержащих количественные оценки межремонтных сроков, времени ремонта, частоты и времени подналадок оборудования, средств автоматизации и механизации, используемых на технологической операции, времени, необходимого для смены инструмента, и т. д.

Для оценки величин $\lambda_{10} \div \lambda_{15}$ предлагается использовать следующие выражения:

$$\begin{aligned} \lambda_{10} &= \frac{1}{T_{10}} = \lambda_{01} \frac{1 - P_{н.1}}{P_{н.1}}; \quad \lambda_{12} = \frac{1}{T_{12}} = \lambda_{01} \frac{1 - P_{н.2}}{P_{н.2}}; \\ \lambda_{13} &= \frac{1}{T_{13}} = \lambda_{01} \frac{1 - P_{н.3}}{P_{н.3}}; \quad \lambda_{14} = \frac{1}{T_{14}} = \lambda_{01} \frac{1 - P_{н.4}}{P_{н.4}}; \\ \lambda_{15} &= \frac{1}{T_{15}} = \lambda_{01} \frac{1 - P_{н.5}}{P_{н.5}}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $P_{н.1}$ – вероятность отсутствия отказов, связанных с превышением показателями качества обработанной детали своих предельно допустимых значений; $P_{н.2} \div P_{н.5}$ – вероятности отсутствия отказов в выделенных подсистемах ТС в процессе обработки детали.

Определение значений вероятностей $P_{н.1} \div P_{н.5}$, характеризующих надежность подсистем ТС, предлагается осуществлять на основе моделирования их функционирования работой многоканальных СМО с двумя состояниями, позволяющими рассматривать процессы одновременного развития нескольких ви-

дов преимущественных отказов в выделенных подсистемах ТС [4]. Согласно данной модели вероятности отсутствия отказов в рассматриваемых подсистемах ТС оцениваются следующим выражением:

$$P_{н,i} = \frac{1}{A_i} [1 + (A_i - 1) \exp(-A_i)],$$

$$A_i = \sum_{j=1}^{L_i} \frac{1}{P_{ij}} - (L_i - 1), \quad (8)$$

где P_{ij} – вероятность отсутствия j -го преимущественного отказа в i -й подсистеме ТС; L_i – количество преимущественных видов отказов, возникновение которых возможно при функционировании i -й подсистемы ТС.

На рисунке 2 представлены расчетные значения вероятности P_i , полученные для операции чистовой токарной обработки оси поддерживающего катка 04.33А.101 – 4 гусеничного пропашного трактора Т-4А ОАО «АлтТрак» в зависимости от скорости резания. Обработка проводится на токарном гидрокопировальном полуавтомате модели ЕМ-473. Материал обрабатываемой детали – сталь 45 с $\sigma_b = 700$ МПа; материал инструмента – твердый сплав Т15К6 с $\sigma_n = 1400$ МПа. Режимы резания: подача – $s = 0,3$ мм/об, глубина резания – $t = 2$ мм. Диаметр обрабатываемого участка $D = 50$ мм. Объем обрабатываемой партии $N = 15$ деталей. При построении графика значения параметров λ_{10} , λ_{12} , λ_{13} оценивались по зависимостям (7, 8). Вероятности отсутствия отказов по показателям качества при обработке – $P_{н,1}$, отсутствия отказов в подсистеме обрабатываемого материала – $P_{н,2}$ и отсутствия отказов в подсистеме

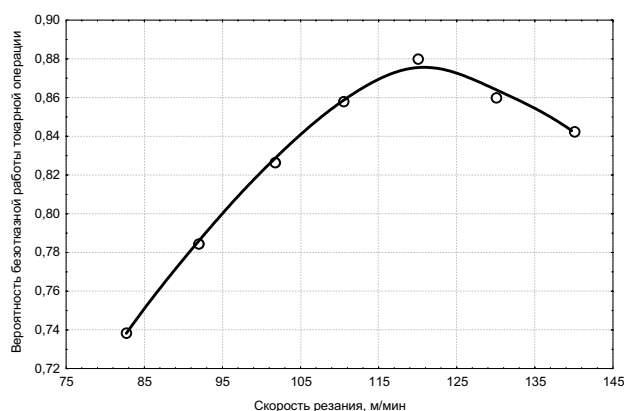


Рисунок 2. Расчетные значения вероятности безотказной работы операции чистовой токарной обработки оси поддерживающего катка 04.33А.101-4 гусеничного пропашного трактора Т-4А ОАО «АлтТрак» в зависимости от скорости резания

режущего инструмента – $P_{н,3}$ оценивали с использованием методик, предложенных в работах [5, 6, 7].

В качестве допущения было принято, что интенсивность потока отказов в подсистемах «инструмент» и «обрабатываемый материал» в ненагруженном состоянии равна интенсивности потока отказов в этих же подсистемах в нагруженном состоянии, т. е.:

$$\lambda_{02} = \lambda_{12}, \quad \lambda_{03} = \lambda_{13}.$$

Значения параметров, характеризующих среднюю интенсивность потока отказов в подсистемах «оборудование» и «средства автоматизации и механизации» – $\lambda_{04}, \lambda_{14}$, среднюю интенсивность устранения отказов данных подсистем – $\lambda_{40}, \lambda_{41}$, а также интенсивность устранения отказов в подсистемах «инструмент» и «обрабатываемый материал» – $\lambda_{20}, \lambda_{21}$, $\lambda_{30}, \lambda_{31}$ – определяли по результатам исследований, проведенных в условиях действующего производства. В процессе проведения исследований фиксировали вид отказа, время его возникновения, а также время, необходимое для устранения отказа с учетом времени подналадки для восстановления работоспособности ТС. Численные значения вышеперечисленных параметров приведены в таблице 3.

При проведении исследований отказы в подсистеме «средства автоматизации и механизации» зафиксированы не были. Поэтому при дальнейших расчетах было принято, что данная подсистема «абсолютно надежна», т. е. $\lambda_{05} = \lambda_{50} = 0$.

Выводы. На основании результатов исследований, проведенных в работе, можно сделать следующие выводы о том, что:

– вероятностной моделью надежности технологической операции может являться система массового обслуживания с ненадежными каналами обслуживания, выход которых из строя имитирует возникновение отказов в подсистемах «обрабатываемый материал», «инст-

Таблица 3. Значения параметров СМО, моделирующей функционирование операции чистовой токарной обработки оси поддерживающего катка 04.33А.101 – 4.

№	Параметр λ_{ij}	Значение параметра λ_{ij} , c^{-1}
1	$\lambda_{04} \approx \lambda_{14}$	$2,8 \cdot 10^{-6}$
2	$\lambda_{20} \approx \lambda_{21}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$
3	$\lambda_{30} \approx \lambda_{31}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$
4	$\lambda_{40} \approx \lambda_{41}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$

румент», «основное оборудование», «средства автоматизации и механизации»;

– полученные расчетные значения вероятности безотказной работы ТС токарной операции имеют экстремальный характер, что позволяет использовать показатели надежности в качестве дополнительного критерия при оптимизации процесса резания;

– допущение о простейшем характере потоков событий, переводящих СМО из состояние в состояние, обуславливает более тяжелые условия ее функционирования по сравнению с реальными техническими системами. Таким образом, полученные результаты могут рассматриваться как «нижние» оценки надежности технологической операции.

Список использованной литературы:

1. Вильсон А.Л. Расчет оптимальных скоростей резания с учетом требований к надежности инструмента // Станки и инструмент №5, 1984. – С. 29-31.
2. Палей С.М., Малышев С.А. Комплексный подход к выбору правила замены режущего инструмента в ГПМ // Станки и инструмент №7, 1992. – С. 4-8.
3. Ивченко Г.И., Каштанов В.А., Коваленко И.Н. Теория массового обслуживания: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 1982. – 256 с.
4. Степанский Л.Г. Оценка стойкости инструмента для обработки давлением: Учеб. пособие. – М.: Мосстанкин, 1988. – 68 с.
5. Шашок А.В. Оценка надежности функционирования режущего инструмента на операциях токарной обработки // Вестник машиностроения. 2002. №9. – С. 60-63.
6. Шашок А.В. Вероятностная оценка усталостной прочности проходных токарных резцов с пластинами из твердого сплава // Известия Вузов. Машиностроение. 2002. №9. – С. 19-24.
7. Шашок А.В. Надежность формообразования при токарной обработке деталей типа тел вращения в патроне. Технология машиностроения. 2004. №2. – С. 10-14.